

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой общей физики ФТИ

 А.М. Лидер

« ___ » _____ 2016 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № ПК-08-1

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Методические указания к выполнению лабораторной работы
по курсу «Общая физика» по теме «Электричество и магнетизм»
для студентов всех направлений и специальностей

Томск-2016

УДК 53 (076.5)

Электрическое поле. Методические указания к выполнению лабораторной работы № ПК-08-1 по курсу «Общая физика» по теме «Электричество и магнетизм» для студентов всех направлений и специальностей. 10 с.

Составитель Т.Н. Мельникова
 В.А. Стародубцев

Методические указания рассмотрены и рекомендованы методическим семинаром кафедры общей физики 2016 г.

Зав. кафедрой ОФ: А.М. Лидер.



ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Цель работы: применение принципа суперпозиции для нахождения напряженности поля и распределения силовых линий поля одного, двух и трех зарядов.

1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Основным законом электростатики является экспериментально установленный закон Кулона (8.1), справедливый для точечных зарядов.

$$F = \frac{|q||Q|}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}. \quad (8.1)$$

Здесь обозначено: Q и q – заряды тел, r – расстояние между заряженными телами, ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды, в которой располагаются заряды, ϵ_0 – электрическая постоянная, F – абсолютная величина силы взаимодействия заряженных тел, размерами которых можно пренебречь, по сравнению с расстоянием между ними.

Однако математическое выражение закона взаимодействия зарядов не раскрывает физической картины самого процесса взаимодействия, не отвечает на вопрос, каким путем осуществляется действие заряда q_1 на заряд q_2 . Закон Кулона не объясняет механизм передачи электромагнитного взаимодействия: близкое действие (непосредственный контакт) или дальнее действие? Если заряды действуют друг на друга на расстоянии, то скорость передачи взаимодействия должна быть бесконечно большой, взаимодействие должно распространяться мгновенно. На опыте скорость конечна (скорость света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с).

Возможный ответ на этот вопрос давала *теория дальнего действия*, которая утверждала, что электрические заряды обладают способностью мгновенно действовать друг на друга на расстоянии.

Теория ближнего действия, созданная на основе работ английского физика Майкла Фарадея (1791—1867), объясняет взаимодействие электрических зарядов тем, что вокруг каждого электрического заряда существует *электрическое поле*. Электрическое поле заряда — материальный объект, оно непрерывно в пространстве и способно действовать на другие электрические заряды. Согласно представлениям теории ближнего действия, взаимодействие электрических зарядов q_1 и q_2 есть результат действия поля заряда q_1 на заряд q_2 и поля заряда q_2 на заряд q_1 .

Количественное выражение электростатического взаимодействия в теории дальнего действия и в теории ближнего действия имеет один и тот же вид (закон Кулона). Поэтому на основе изучения законов электростатики нельзя сделать обоснованный выбор между этими двумя теориями. Тот факт, что электрическое поле объективно существует, что оно материально, доказывается опытами с ускоренно движущимися электрическими зарядами. Пока электрические заряды q_1 и q_2 неподвижны и находятся в точках A и B , на заряд q_2 со стороны заряда q_1 действует сила \vec{F}_3 , направленная вдоль прямой AB (рис. 1).

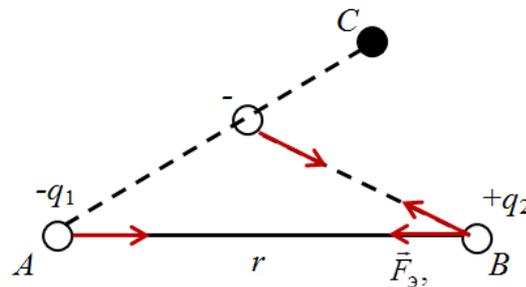


Рис. 1

Если в некоторый момент времени t заряд q_1 , начнет двигаться из точки A к точке C , модуль и направление силы \vec{F}_3 , действующей на заряд q_2 , должны измениться. Согласно представлениям теории дальнего действия, эти изменения должны происходить мгновенно, т. е. в любой момент времени сила \vec{F}_3 должна быть направлена вдоль прямой, соединяющей заряды, и модуль силы \vec{F}_3 должен определяться по закону Кулона.

Однако в действительности наблюдается другая картина. Если в некоторый момент времени t заряд q_1 выходит из состояния покоя и движется ускоренно, то изменение силы \vec{F}_3 , действующей со стороны заряда q_1 на заряд q_2 , наблюдается лишь через интервал времени Δt , определяемый выражением

$$\Delta t = \frac{r}{c},$$

где r – расстояние между зарядами, c – скорость света, равная 300000 км/с. Запаздывание изменений взаимодействия электрических зарядов при их ускоренном движении доказывает справедливость теории ближнего действия, т. е. существование электрического поля как материального объекта, способного действовать на электрические заряды. Скорость света c – есть скорость распространения изменений,

возникающих в электрическом поле при ускоренном движении электрических зарядов. Запаздывание изменений в электрическом поле на расстояниях в несколько метров обнаружить довольно трудно из-за большой скорости их распространения. А в космонавтике эти запаздывания не только легко обнаружимы, но и создают определенные трудности в управлении космическими аппаратами.

Например, команды, отправленные антеннами радиопередатчиков с пункта космической связи, достигали приемных антенн лунохода лишь через 1,3 с после их отправления, так как расстояние от Земли до Луны составляет примерно 400 тыс. км. При осуществлении посадки на поверхность планеты Венера автоматические космические станции «Венера» получали команды с Земли спустя 3,5 мин после их отправления, так как расстояние между Землей и Венерой при этом превышало 60 млн. км.

Для объяснения вводится понятие электрического поля (впервые – М. Фарадей) – особый вид материи, существующий вокруг любого электрического заряда и проявляющий себя в действии на другие заряды.

Действие электрических сил принято описывать следующим образом. Мы говорим, что точечный заряд Q создает в окружающем его пространстве такое состояние, на которое другой точечный заряд q реагирует, испытывая действие силы, величина которой определяется по закону Кулона (8.1).

Это "состояние пространства" и называется электрическим полем заряда Q . Поскольку силы действия и противодействия равны по величине, мы можем говорить также, что и заряд q создает электрическое поле, на которое реагирует заряд Q . Так как силовое действие передается через физически измененное пространство (через пространство "занятое" электрическим полем), то необходимо найти способ описания его состояния.

Разделим обе части выражения (8.1) на q :

$$\frac{F}{q} = \frac{|Q|}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}. \quad (8.2).$$

Правая часть выражения (8.2) не зависит от величины q , а определяется только величиной заряда – источника поля Q и квадратом расстояния между зарядами r . Поэтому говорят, что правая часть (8.2) является характеристикой *электрического поля* заряда-источника, и она будет одинаковой для любого заряда q помещенного в данную точку пространства.

Величину силы, действующей на единицу заряда, называют *напряженностью электрического поля*:

$$E = \frac{F}{q}. \quad (8.3).$$

Выражение (8.3) является определением величины напряженности электрического поля, создаваемого точечным зарядом. Используя определение (8.3) и закон Кулона (1), можно получить для поля одного точечного заряда:

$$E = \frac{|Q|}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}. \quad (8.4)$$

Отметим, что эта формула не является определением напряженности поля!

Вектор напряженности электрического поля \vec{E} направлен от положительно заряженного источника, для отрицательного заряда-источника направление вектора \vec{E} противоположно.

Для системы нескольких точечных зарядов (они могут являться частями общего тела, молекулы и т.д.) по принципу суперпозиции находим:

$$\vec{E}(r) = \vec{E}_1(r) + \vec{E}_2(r) + \vec{E}_3(r) + \dots,$$

где сумма является геометрической, учитывающей как величину, так и направление каждого из векторов напряженности.

Наглядное представление о поле действия электрических сил в плоскости расположения точечного заряда (или нескольких зарядов) дают *линии напряженности*.

Это непрерывные линий, проведенные вокруг заряда-источника таким образом, что касательная к любой точке любой линии совпадает с направлением вектора напряженности в этой точке, а число линий определяется абсолютной величиной заряда-источника. С учетом направления вектора \vec{E} , можно говорить, что положительный заряд является *источником* силовых линий напряженности, тогда как отрицательный заряд служит *стоком*, в него линии вектора \vec{E} входят. Касательная к любой точке линии напряженности показывает направление силы Кулона, действующей на помещенный в эту точку пробный заряд, поэтому линии напряженности называют так же *силовыми линиями электрического поля*.

Электростатическое поле называется **однородным**, напряженность которого во всех точках одинакова по величине и направлению, т.е. $\vec{E} = \text{const}$. Однородное электростатическое поле изображается параллельными силовыми линиями на равном расстоянии друг от друга (такое поле существует, например, между пластинами конденсатора).

Густота силовых линий должна быть такой, чтобы единичную площадку, нормальную к вектору напряженности пересекало такое их число, которое равно модулю вектора напряженности $|\vec{E}|$, т.е.

$$|\vec{E}| = \frac{\text{число линий}}{\text{площадь } S} = \frac{\Phi}{S}.$$

2. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Силовые линии электрического поля.

1. Включите компьютер.
2. Зайдите под своим логином и паролем.
3. Откройте папку «Виртуальные лабораторные работы», расположенную на рабочем столе.
4. Откройте файл «ПК-08-1. Электрическое поле». Если при открытии файла у вас появятся какие-то неведомые символы вместо привычных русских или английских слов, поменяйте кодировку одновременным нажатием клавиш «Alt» и «Enter».

Задание 1. Поле одного точечного заряда.

1. Введите значения величин зарядов, их координат и других параметров:

$$\begin{aligned} Q_1 &= 3 \text{ нКл}, Q_2 = 0, Q_3 = 0, Z_i = 0, \\ X_1 &= 0,6 \text{ см}, X_2 = 0,2 \text{ см}, X_3 = 1 \text{ см}, \\ \varepsilon &= 1, M = 1, MZ = 1, S = 0,01, Z_0 = 1, X_0 = 1. \end{aligned}$$

2. Получив на экране картину линий напряженности, подсчитайте полное число линий вокруг данного заряда, определите число линий, создаваемых единицей заряда (для наших условий моделирования), запишите это значение в отчет.

Задание 2. Поле трех точечных положительных зарядов.

1. Измените значения только трех величин: $Q_1 = 5 \text{ нКл}$, $Q_2 = 1 \text{ нКл}$, $Q_3 = 1 \text{ нКл}$.
2. Полученную картину линий скопируйте и занесите в отчет. Рядом укажите значения зарядов. Для одного найдите на клавиатуре компьютера клавишу «PrintScreen». Нажмите ее, чтобы изображение экрана компьютера было скопировано. Затем откройте заготовку отчета по работе и с помощью клавиш «Ctrl» + «V» вставьте в него изображение экрана. Уменьшите его по своему усмотрению и обрежьте, используя команды редактора Word «Работа с рисунками» и «Обрезка».

3. Обратите внимание на те области, где плотность линий больше. В этих местах будет высокая напряженность поля. Но даже в таких областях линии напряженности не пересекают друг друга.

Задание 3. Поле трех одинаковых зарядов.

1. Измените значения зарядов: $Q_1 = 3$ нКл, $Q_2 = 3$ нКл, $Q_3 = 3$ нКл.
2. Сравнив полученные результаты с предыдущим случаем, ответьте на вопрос: Как при этом изменяется распределение линий напряженности в различных областях пространства между зарядами?

Задание 4. Поле трех не одинаковых зарядов.

1. Введите отрицательное значение для одного из зарядов:
 $Q_1 = -3$ нКл, $Q_2 = 3$ нКл, $Q_3 = 3$ нКл.
2. Рассмотрите конфигурацию поля. Отметьте, где поле достигает наибольшей величины, а где напряженность поля меньше всего. Чтобы посмотреть "издалека" на такую систему, измените масштаб картины.
3. Введите следующие значения параметров:
 $X_1 = 1,8$ см, $X_2 = 1,6$ см, $X_3 = 2,0$ см, $M = 3$, $Z_m = 3$.

Получив распределение, пересчитайте число линий напряженности поля, обходя три заряда по границе рисунка, и сравните с числом линий, создаваемом точечным зарядом в Задании 1. Как связано полученное число линий с величиной полного заряда системы? Запишите в отчет Ваш вывод, указав условия, при которых систему зарядов можно принять за эквивалентный точечный заряд.

Задание 5. Поле диполя.

1. Введите значения нулевого значения $Q_2 = 0$, $X_1 = 1,0$ см.
При таком выборе параметров моделирования Вы получите *диполь* – систему из двух равных по величине и противоположных по знаку зарядов.
2. Скопируйте картинку распределения силовых линий диполя, укажите значения зарядов и расстояния между ними. Обратите внимание на симметрию картины.
3. Распределение линий зависит от величины расстояния между зарядами.
Чтобы "почувствовать разницу", измените положение первого заряда, введя сначала $X_1 = 1,5$ см, затем $X_1 = 1,9$ см, выполните расчеты.
4. Обратите внимание, как при этом уменьшается число линий поля снаружи диполя, и как они "собираются" в область между зарядами.

Что произойдет, когда координаты зарядов Q_1 и Q_2 будут отличаться на очень малую величину? Запишите Ваш вывод в отчет.

Задание 6. *Поле трех зарядов в угловом положении.*

1. Введите следующие значения параметров:

$$Q_1 = 2,5 \text{ нКл}, Q_2 = 5 \text{ нКл}, Q_3 = 2,5 \text{ нКл}, Z_1 = 0,5 \text{ см}, X_1 = 1,5 \text{ см}, \\ X_2 = 1,5 \text{ см}, X_3 = 2 \text{ см}.$$

2. По результатам моделирования опишите в отчете, в чем отличие полученной картины от распределения линий напряженности в случае линейного расположения зарядов.

Задание 7. *Поле разных по знаку зарядов.*

1. Измените только значение заряда $Q_2 = -5$ нКл. Рассмотрите картину силовых линий и ответьте на вопрос: На поле какой системы зарядов похоже данное поле?

2. Чтобы аналогия стала еще заметнее, можно изменить расстояния между зарядами:

$$\text{сначала } Z_1 = 0,3 \text{ см}, X_1 = 1,5 \text{ см}, X_2 = 1,5 \text{ см}, X_3 = 1,8 \text{ см}, \\ \text{а затем: } Z_1 = 0,1 \text{ см}, X_1 = 1,5 \text{ см}, X_2 = 1,5 \text{ см}, X_3 = 1,6 \text{ см}.$$

3. Скопируйте последнее распределение, укажите значения зарядов и расстояний между ними.

ГЛОССАРИЙ

1. **Аддитивность** – свойство величин, состоящее в том, что значение величины, соответствующее целому объекту, равно сумме значений величин, соответствующих его частям, в некотором классе возможных разбиений объекта на части. Аддитивность (суммируемость) заряда означает, что заряд системы заряженных тел равен сумме зарядов каждого тела.
2. **Близкодействие** (или короткодействие) — концепция, согласно которой взаимодействия передаются с помощью особых материальных посредников и с конечной скоростью. Например, в случае электромагнитных взаимодействий таким посредником является электромагнитное поле, распространяющееся со скоростью света.
3. **Дальнодействие** — концепция, согласно которой тела действуют друг на друга без материальных посредников, через пустоту, на любом расстоянии. Такое взаимодействие осуществляется с бесконечно большой скоростью (но подчиняется определенным законам). Примером силы, считавшейся одним из примеров

непосредственного действия на расстоянии, можно считать силу всемирного тяготения в классической теории гравитации Ньютона, силу кулоновского взаимодействия двух электрических зарядов до создания теории Максвелла и магнитные силы в конкурировавших с максвелловской теорией теориях электромагнетизма Вебера и других.

4. **Дискретность** – разделенный, прерывистый. Дискретность заряда это наличие элементарного заряда (обозначаемого e) и кратность любого заряда этому элементарному. Формула, описывающая это свойство: $q = Ne$, где N – любое целое число.
5. **Закон Кулона** – Модуль силы взаимодействия двух точечных зарядов в вакууме прямо пропорционален произведению модулей этих зарядов и обратно пропорционален квадрату расстояния между ними.
6. **Закон сохранения заряда** – алгебраическая сумма зарядов электрически замкнутой системы, через границы которой не могут проникать заряженные частицы, сохраняется.
7. **Инвариантность** – термин, обозначающий нечто неизменяемое. Инвариантность заряда означает одинаковость результата измерения заряда во всех инерциальных системах отсчета.
8. **Линии напряженности** – это линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с вектором напряженности в данной точке поля. **Линии напряженности** электростатического поля никогда не могут быть замкнуты сами в себя. **Линии напряженности** имеют обязательно начало и конец, либо уходят в бесконечность. **Линии напряженности** электрического поля направлены от положительного заряда к отрицательному, они никогда не пересекаются.
9. **Напряженность электрического поля** – векторная физическая величина, характеризующая электрическое поле в данной точке и численно равная отношению силы действующей на неподвижный точечный заряд, помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда.
Из этого определения видно, почему напряжённость электрического поля иногда называется *силовой характеристикой электрического поля* (действительно, всё отличие от вектора силы, действующей на заряженную частицу, только в постоянном множителе).
10. **Принцип суперпозиции** – один из самых общих законов во многих разделах физики. В самой простой формулировке принцип суперпозиции гласит: *Результат воздействия на частицу*

нескольких внешних сил есть векторная сумма воздействия этих сил.

11. **Электрическое поле** — одна из двух компонент электромагнитного поля, представляющая собой векторное поле, существующее вокруг тел или частиц, обладающих электрическим зарядом, а также возникающее при изменении магнитного поля (например, в электромагнитных волнах). Электрическое поле непосредственно невидимо, но может быть обнаружено благодаря его силовому воздействию на заряженные тела.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение электрического заряда.
2. Сформулируйте свойство дискретности заряда.
3. Сформулируйте свойство аддитивности заряда.
4. Сформулируйте свойство инвариантности заряда.
5. Сформулируйте закон сохранения заряда.
6. Сформулируйте закон Кулона.
7. Дайте определение электростатического (электрического) поля.
8. Что называется напряжённостью электрического поля?
9. Сформулируйте принцип суперпозиции электрических полей.
10. Объясните физический смысл относительной диэлектрической проницаемости.
11. Напишите формулы для расчёта напряжённости поля точечного заряда, заряженной сферы, бесконечной заряженной плоскости.
12. Что называется разностью потенциалов?
13. Чему равна работа по перемещению заряда в электростатическом поле?
14. Чему равна объёмная плотность энергии электростатического поля?
15. Назовите единицы заряда, напряжённости электрического поля.
16. Объясните физический смысл единиц заряда, напряжённости электрического поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики.- М.: ВШ, 1989.-608с.
2. Мэрион Дж.Б. Общая физика с биологическими примерами.- М.:ВШ,1986.-623с.
3. Ремизов А.Н. Курс физики, электроники и кибернетики.-М.-:ВШ,1982.

4. Суорц Кл.Э. Необыкновенная физика обыкновенных явлений. Пер. с англ. в 2-х томах . Т.2.-М : Наука. 1987.-384 с. V
5. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: учебное пособие для втузов. - М. Высшая школа. 1989.-608с.
6. Крауфорд Ф. Волны. Учебное руководство: пер. с англ./ Под ред. А.И. Шальникова и А.О. Вайсенберга. -М.: Наука. 1984. (Берклевский курс физики).-520 с.
7. Мигдал А.Б. Квантовая физика для больших и маленьких. М.:Наука,1989.-144с.
8. Пономарев Л.И. Под знаком кванта.-М.:Наука,1989.-368с.
9. Готфрид К., Вайскопф В. Концепции физики элементарных частиц.- М.:Мир,1988.-218с.